文章编号:1000-4939(2023)06-1298-10

基于有限质点法的单层柱面网壳冲击作用下动态响应

丁北斗[1],秦天琦[1],马占国[2],张鲲鹏[3],徐娜娜[1],施岑岑[1]

(1. 中国矿业大学江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性高校重点实验室,221116 徐州;
2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,221116 徐州;
3. 上海公路桥梁(集团)有限公司,200433 上海)

摘　要:为了探究单层柱面网壳结构受冲击作用下的动态响应,验证有限质点法模拟网壳结构冲击动态响应的准确性,建立了 7 个冲击工况的有限质点法模型,采用以对称罚函数为基础的双球碰撞模型为冲击模型,根据能量守恒定律确定冲击模型中碰撞刚度系数,引入 Cowper-Symonds 本构模型,获取结构动力响应,并将模拟结果与试验结果对比。结果表明:1)有限质点法得到的冲击力时程变化曲线与试验结果相近;2)由于未考虑结构损伤因素,有限质点法所得节点位移略小于试验值,但所获得的结构失稳动量与试验一致;3)冲击产生的网壳应变能更易沿着网壳斜杆传递,同时冲击区杆件,刚度较大区域如支座附近的杆件为结构的主要受力构件。有限质点法可以较为准确的判断单层柱面网壳结构受冲击作用的动态响应,可为提高相关结构抗冲击性能提供理论依据。

关键词:单层柱面网壳结构抗冲击性能;有限质点法;单层柱面网壳试验;动态响应;对比分析

中图分类号:TU399　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.010

Dynamic response of single-layer cylindrical latticed shell under impact based on finite particle method

DING Beidou[1], QIN Tianqi[1], MA Zhanguo[2], ZHANG Kunpeng[3], XU Nana[1], SHI Cencen[1]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, 221116 Xuzhou, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, 221116 Xuzhou, China; 3. Shanghai Road and Bridge (Group) Co. LTD., 200433 Shanghai, China)

Abstract: To study the dynamic response of single-layer cylindrical latticed shell under impact and examine the accuracy of finite particle method (FPM) in simulating the dynamic response of latticed shell structure, 7 FPM models were established based on 7 impact conditions, which were adopted contact model of double ball deriving from symmetrical penalty function and were introduced Cowper-Symonds

收稿日期:2022-04-08　　**修回日期**:2022-06-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFE0118500);国家自然科学基金资助项目(No. 51978656);徐州市科技局社会发展重点资助项目(No. KC19216)

通信作者:丁北斗,副教授。E-mail:dbdstar@163.com

引用格式:丁北斗,秦天琦,马占国,等.基于有限质点法的单层柱面网壳冲击作用下动态响应[J].应用力学学报,2023,40(6):1298-1307.
DING Beidou, QIN Tianqi, MA Zhanguo, et al. Dynamic response of single-layer cylindrical latticed shell under impact based on finite particle method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(6):1298-1307.

constitutive model. The law of energy conservation was used for obtaining impact stiffness coefficients in contact model. The results of simulation were used to reveal the dynamic response of structure and were compared with experimental ones. The results show that 1) time history curves of impact force were close those of experimental ones, 2) node displacements got in FPM were smaller than those of experiment due to failure of considering damage factors of latticed shell, but its destabilizing momentum was the same as that of experiment, 3) strain energy which was generated from impact had a tendency to transfer through the braces. Meanwhile, members in impact area and high stiffness area, such as adjacent supports area, were the main forced components. In total, FPM is an accurate method to simulate dynamic response of single-layer cylindrical latticed shell under impact, which can provide theoretical basis for improving impact resistance of similar structures.

Key words: impact resistance of single-layer cylindrical latticed shell; finite particle method; test of single-layer cylindrical latticed shell; dynamic response; comparative analysis

空间网格结构具有跨度大、造型优美、质量轻、便于标准化等特点,在机场、航站楼、体育场馆等公共建筑中大量使用。为了保证结构服役阶段的安全性,许多学者对网格结构在重力荷载、风荷载、地震作用下的力学性能及抗连续性倒塌性能进行研究。相较于承载力不足、地震作用等因素造成的空间网格结构损伤事故,冲击损伤事故发生的概率较低,但后果往往较为严重。如 1980 年,一架 4 座飞机坠入巴西圣保罗展览中心的网架屋顶,造成严重的财产损失[1]。研究空间网格结构受冲击的动态力学特性,分析其变形机理具有十分重要的意义。

空间网格结构抗冲击性能的数值模拟研究主要基于有限元法,常采用拉格朗日乘子法和对称罚函数法冲击模型,前者可用于隐式求解,后者在显式和隐式求解中均可使用[2],二者都可在有限元软件平台实现。文献[3]和文献[4]均用 ANSYS/LS-DYNA 研究了网格结构受冲击时的动态响应。但为保证收敛,有限元法对时间步和增量步的要求较为严格[2]。

2004 年 TING 等[5-7],提出了基于向量式结构与固体力学的数值模拟方法。喻莹[8]在此基础上面向结构工程领域提出了有限质点法(finite particle method,FPM)。相较于有限元法,有限质点法在分析接触碰撞问题时不需要迭代求解,在每一时间步内单独计算接触力和接触内力,并反作用于质点,无需修正刚度方程,并以显式中央差分法作为求解策略[2]。喻莹等[9]用有限质点法,采用对称罚函数冲击模型模拟了柔性体和刚性体边界碰撞时的形态变化,以及空间梁碰撞时的形态变化,计算结果较为准确。有限质点法亦用于网格结构受冲击性能的数值分析,喻莹等[10]采用理想弹塑性本构模型和 Mises 屈服准则,用有限质点法模拟 K8 网壳受冲击后的连续性倒塌过程。

但目前基于有限质点法研究网格结构受冲击作用的动态响应与试验数据对比较少,同时所采用的材料本构模型基于材料的静态力学性能,而冲击问题需考虑材料在冲击荷载作用下屈服强度和瞬时应力随应变率的变化[11]。为此,本研究将考虑动态屈服强度和应变率关系的本构模型引入单层柱面网壳的有限质点法数值分析,主要研究内容为:1)将基于对称罚函数法的冲击模型和适用于金属冲击的 Cowper-Symonds 本构模型编入有限质点法程序;2)建立单层柱面网壳结构有限质点法模型,研究网壳结构受冲击作用的动态力学响应,并与试验结果对比;3)从应用角度,研究单层柱面网壳在冲击荷载作用下的能量传递路径,探究结构传力特性,找出关键受力构件,为类似结构的抗冲击研究和工程应用提供依据。

1　有限质点法的基本理论

有限质点法将结构离散成一组有限数目的质点,以质点为最小单元描述结构的性质,单元仅起到连接节点的作用。该方法以牛顿第二定律为控制方程,建立关于时间的常微分方程式,将静力和动力问题中质点的受力状态视为准动平衡状态和动平衡状态,其中静力问题通过设置虚拟阻尼系数实现。式(1)和式(2)为具有 6 个自由度的空间质点 J 的控制方程。

$$m_J \ddot{\boldsymbol{x}}_J = \boldsymbol{F}_J = \boldsymbol{F}_J^{\mathrm{ext}} + \boldsymbol{F}_J^{\mathrm{int}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{I}_J \ddot{\boldsymbol{\theta}}_J = \boldsymbol{M}_J = \boldsymbol{M}_J^{\mathrm{ext}} + \boldsymbol{M}_J^{\mathrm{int}} \tag{2}$$

式中：m_J为点 J 的质量，包括点 J 自重和相连单元所提供的等效质量；$\ddot{\boldsymbol{x}}_J$ 和$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_J$ 为点 J 的线加速度向量和角加速度向量；$\boldsymbol{I}_J$为点 J 的质量惯性向量；$\boldsymbol{F}_J$为点 J 的合力向量，包括作用在点 J 的集中力向量 $\boldsymbol{F}_J^{\mathrm{ext}}$、与点 J 相连单元所提供的等效内力向量 $\boldsymbol{F}_J^{\mathrm{int}}$ 等；$\boldsymbol{M}_J$为点 J 的合弯矩向量，包括作用在点 J 的外力矩向量 $\boldsymbol{M}_J^{\mathrm{ext}}$、与点 J 相连单元所提供的等效弯矩向量 $\boldsymbol{M}_J^{\mathrm{int}}$ 等。

变形机制是有限质点法的核心[2]，有限质点法采用虚拟逆向运动和正向运动[12]的方法得到固体结构扣除刚体位移后的纯变形，并由此计算作用在质点的上内力和在单元中产生的应力和应变，而内力和位移之间的关系则通过单元材料本构方程建立。

得到内力后，有限质点法依据显式中央差分法计算下一时刻质点的位移，见式(3)和式(4)。如此往复，直至时间终止。

$$\boldsymbol{x}_{n+1} = C_1 \frac{\boldsymbol{F}_n}{m} h^2 + 2C_1 \boldsymbol{x}_n - C_2 \boldsymbol{x}_{n-1} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{n+1} = C_1 \frac{\boldsymbol{M}_n}{\boldsymbol{I}_n} h^2 + 2C_1 \boldsymbol{\theta}_n - C_2 \boldsymbol{\theta}_{n-1} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{F}_n$为 t_n时刻作用在质点上的合力向量和合弯矩向量；下标 $n-1$，n 和 $n+1$ 分别代表t_n-1、t_n和 t_n+1时刻；h 为时间步长；C_1 和 C_2 分别为虚拟阻尼系数。当 $n=0$ 时，$\boldsymbol{x}_{-1}$和 $\boldsymbol{\theta}_{-1}$没有实际的物理含义，因此根据式(5)和式(6)来计算 $\boldsymbol{x}_1$和 $\boldsymbol{\theta}_1$。

$$\boldsymbol{x}_1 = \boldsymbol{x}_0 + h\dot{\boldsymbol{x}} + \frac{h^2}{2} \cdot \frac{\boldsymbol{F}_0 + \boldsymbol{f}_d}{m} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\theta}_1 = \boldsymbol{\theta}_0 + h\dot{\boldsymbol{\theta}} + \frac{h^2}{2} \cdot \frac{\boldsymbol{M}_0 + \boldsymbol{m}_d}{\boldsymbol{I}_0} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{f}_d$和 $\boldsymbol{m}_d$为设置的虚拟阻尼力和虚拟质量。

2 冲击试验

本课题组刘建伟[1]进行了冲击作用下单层柱面网壳动态响应的试验，以研究其动态响应和动力稳定性。

试验选用规格为 $\Phi10\times2$ 的无缝钢管，弹性模量 $E=1.87\times10^5$ MPa，剪切模量 $G=7.19\times10^4$ MPa，屈服强度为 262 MPa，极限强度为 368 MPa，泊松比为 0.3，单位长度质量 $m=0.222$ kg/m。杆件通过尺寸为 100 mm × 100 mm × 8 mm 的节点板焊接在一起。网壳以铰接的方式与反力架相连。冲击物为质量分别是 20、5、2.18 kg 的硬质圆钢。网壳跨度为 1 500 mm，矢高为 375 mm，纵向长度为 2 000 mm，在点 B 放置 YZC-526/1 000 kg 应变式力传感器，通过应变仪采集冲击力，并在点 A、B、C、D、E、F 放置 DH808 拉线式位移传感器。图 1 和图 2 分别为现场装置图和试验装置示意图。

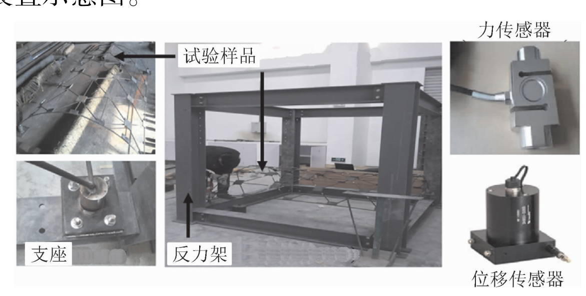


图 1 试验现场装置图

Fig. 1 Diagram of field test device

冲击物通过设置于反力架上横梁的滑轮装置，以自由落体的方式冲击网壳节点 B，如图 2(b)所示。通过调整冲击物的下落高度来改变冲击速度，共包含表 1 所示的 7 种工况。其中冲击速度是冲击物和网壳接触时的瞬时速度；WC 代表工况。

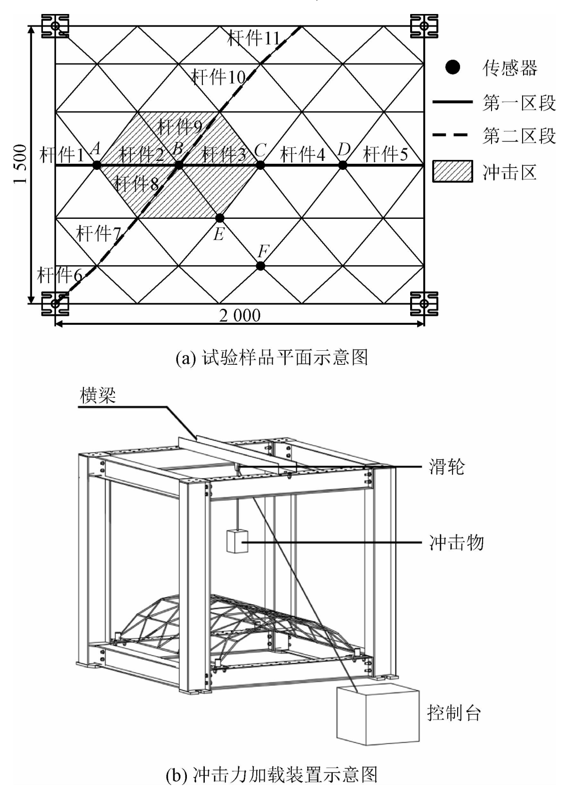


图 2 试验加载示意图

Fig. 2 Test loading scheme

考虑到加工时可能出现的尺寸误差，试验前对结构杆件实际长度进行 3 次测量校正，测量结果取平均值，作为数值模拟的模型几何参数。

表 1　各工况计算参数

Tab. 1　Experimental conditions

冲击点	WC	冲击物质量/kg	冲击物速度/($m \cdot s^{-1}$)	冲击动量/($kg \cdot m \cdot s^{-1}$)
B	1	2.18	2	4.36
B	2	2.18	2.844	6.2
B	3	2.18	4	8.72
B	4	5	1	5
B	5	5	2	10
B	6	5	4	20
B	7	20	6	120

3　有限质点法程序编制

为简化分析,假设冲击物为刚性体;冲击过程产生的热能和摩擦忽略不计;发生多次冲击时,第一次冲击的结构动态响应最为关键,故本研究只考虑一次冲击。

3.1　建立冲击模型

基于本课题组此前研究[13],采用以对称罚函数为基础的双球碰撞模型。

对称罚函数原理为,每一个时间步都要检查冲击物和被冲击物之间是否发生穿透,没有则不作任何处理,认为冲击力为零;如果发生穿透,则假想冲击物和被冲击物之间有一个弹簧(图 3)阻碍穿透发生。假设弹簧的刚度为 k_c,可建立冲击力计算公式,即

$$\Delta = s - d_1 - d_2$$
$$F_c = \begin{cases} -k_c \times \Delta, & \Delta < 0 \\ 0, & \Delta \geqslant 0 \end{cases} \qquad (7)$$

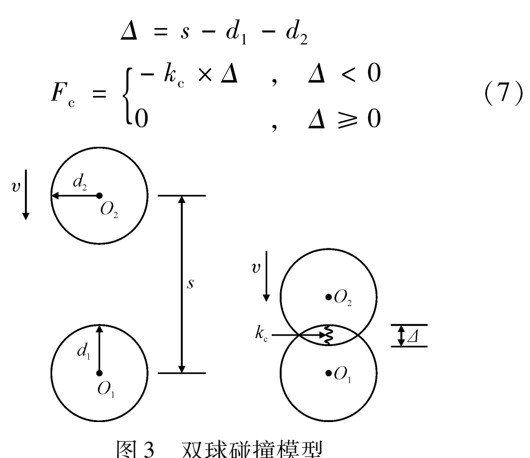


图 3　双球碰撞模型

Fig. 3　Contact model of double ball

图中:k_c为假想弹簧的刚度系数,即碰撞刚度系数;O_1为被冲击物;O_2为冲击物;d_1、d_2分别为被冲击物和冲击物的质点到接触面的距离;Δ 是两球外表面间的距离,若 $\Delta \geqslant 0$ 表明没有发生冲击行为,反之则发生冲击行为。

3.2　确定碰撞刚度系数

根据式(7),确定碰撞刚度系数是计算冲击力的前提。本节从能量角度给出确定碰撞刚度系数的方法。

冲击过程的能量变化可分为 2 个阶段[14-15]。第 1 阶段时间为毫秒级,冲击物的动能部分转化成网壳冲击区的动能,此时非冲击区的动能和和结构应变能较小;第 2 阶段中冲击区的动能迅速向非冲击区传递,结构应变能逐渐增加,最后结构的动能通过结构的势能和应变能耗散,这一过程的时间以秒计。针对高速冲击,两阶段能量变化特征较为明显,可以第 1 阶段末为临界点将网壳整体动量和能量守恒转化为冲击区的动量和能量守恒。但对于低速冲击,非冲击区在第 1 阶段就已产生明显的动力响应[15],上述方法则不再适用,故采取式(8),根据整体结构的能量守恒求解碰撞刚度系数,即

$$\Delta W_{GM} + \Delta W_{GW} = \Delta W_{GS} + \Delta E_s + \Delta E_{int} \qquad (8)$$

式中:ΔW_{GW} 和 ΔE_{GW} 分别为冲击物势能改变量和动能改变量;ΔW_{GS}、ΔE_S 和 ΔE_{int} 为分别为结构势能改变量、动能改变量和应变能改变量;式(8)适用于未发生构件断裂的结构。对每一个冲击工况,均有唯一的结构碰撞刚度系数 k_{ck} 与之对应。若数值分析所输入的碰撞刚度系数 k_c 不等于 k_{ck},则式(8)不再守恒,令等式左边与右边的差值为冲击前后系统能量差 ΔW。通过数据拟合,以 $\Delta W = 0$ 时所对应的 k_c 为结构碰撞刚度系数 k_{ck}。确定碰撞刚度系数的流程如图 4 所示。

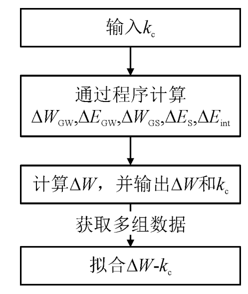


图 4　计算碰撞刚度系数流程图

Fig. 4　Flow chart of calculating impact stiffness efficient

3.3　本构模型的选取

相较于静力学问题,冲击问题需考虑惯性效应和应变率效应[16],常用的金属动态力学行为本构模型包括 Cowper-Symonds 模型、Johnson-Cook 模型、Bammann 模型和 Zerilli-Armstrong 模型。Cowper-Symonds 模型建立了应变率和材料动态屈服强度的关系。Johnson-Cook 模型在此基础之上考虑了温度

对动态屈服强度的影响。Bammann 模型的基本方程需要包括损伤参数、内变量等在内的多种材料参数[17]。Zerilli-Armstrong 模型基于位错动力学,考虑了温度的影响,适用于体心立方模型和面心立方模型[18]。鉴于数值模拟参照试验在室温环境下进行,故不考虑温度对冲击试验的影响。同时 Bammann 模型所需材料参数较多,故选择 Cowper-Symonds 模型,该模型在网壳结构受冲击研究中被广泛应用,模型公式为

$$\sigma_{\mathrm{d}} = (\sigma_0 + E_{\mathrm{p}}\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}})\left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/p}\right] \tag{9}$$

式中:σ_{d}和 σ_0分别为动静态屈服应力;$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 和$\dot{\varepsilon}$分别为等效塑性应变和等效应变率;E_{p}为塑性硬化模量;C 和 p 为常数。针对参照试验,C 和 p 分别取 40 和 5[13]。

冲击力学模型程序编写思路参照文献[19],根据式(10)判断材料是否进入塑性状态。若 $\Phi > 0$,则进入塑性状态,反之则为弹性状态。在判断前,认为单元统一处于弹性阶段,应力应变根据弹性理论计算,此时所得应力为预测应力。当满足 $\Phi > 0$ 时,单元进入塑性阶段,此时需根据式(11)更新单元应力应变[19],使之满足塑性要求,更新后的应力称为真实应力。

$$\Phi = \bar{\sigma} - \sigma_{\mathrm{d}} \tag{10}$$

$$\sigma_{ij,t+\Delta t} = \sigma_{ij,\mathrm{tr},t+\Delta t} - 3G\Delta\lambda\frac{S_{ij,t+\Delta t}}{\bar{\sigma}_{t+\Delta t}} \tag{11}$$

式中:下标 $t+\Delta t$ 代表时刻;$\bar{\sigma}$为等效应力;σ_{d}为动态屈服强度;$\sigma_{ij,t+\Delta t}$和$\sigma_{ij,\mathrm{tr},t+\Delta t}$为真实应力和预测应力;$G$ 为剪切模量;$S_{ij,\mathrm{tr},t+\Delta t}$为偏应力分量;$\Delta\lambda$ 为塑性流动因子增量。各参数的详细计算方法见文献[19]。

结构材料采用分段线性弹塑性模型,见图 5。

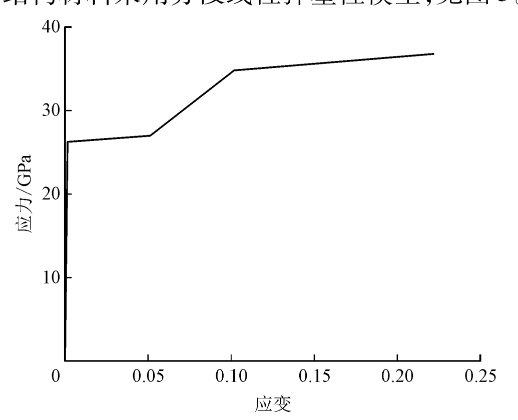


图 5 材料分段线性弹塑性模型

Fig. 5 Piecewise linear elastoplastic model of material

3.4 程序编制

程序编制流程如图 6 所示。t_0时刻模型包含网壳质点坐标和冲击物坐标。结构在 t_0时刻的三维模型如图 7 所示。

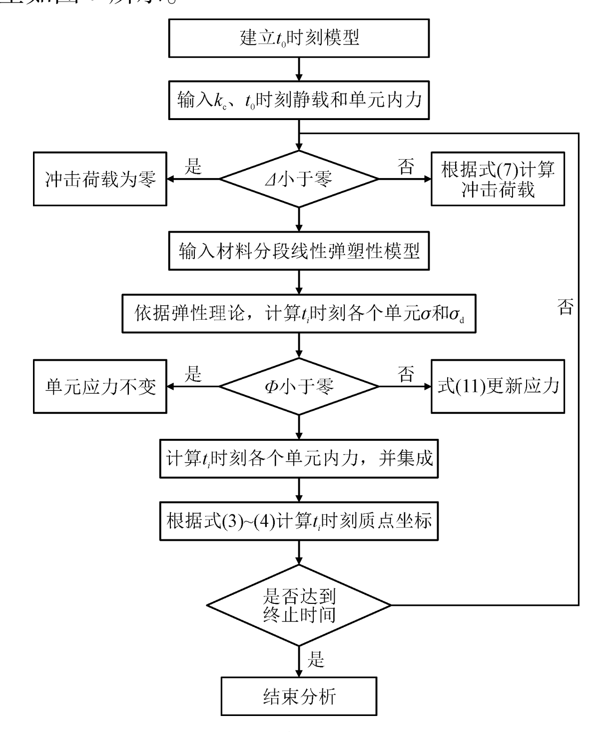


图 6 程序编制流程图

Fig. 6 Flow chart of programming

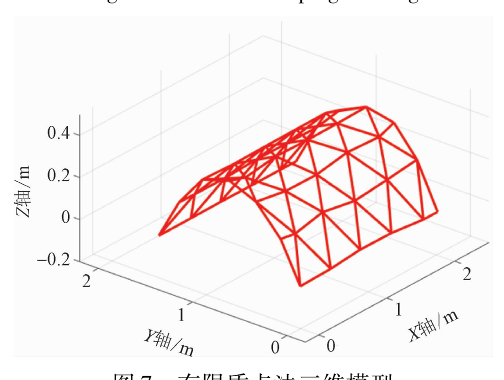


图 7 有限质点法三维模型

Fig. 7 3D model of FPM

4 结果与分析

4.1 确定碰撞刚度系数

本节基于有限质点法利用 MATLAB R2019a 数学分析软件模拟上述试验过程,并对比模拟结果。文献[9]建议取 $1\times10^{-6}\sim1\times10^{-4}$ s 作为碰撞问题的时间步长,本研究取 1×10^{-5} s,模拟试验中 7 个

工况。

以工况 5 和工况 6 为例展现碰撞刚度系数的求解过程,表 2 记录了第一阶段末工况 5 和工况 6 选取不同碰撞刚度系数所获取的能量参数,建立ΔW-k_c拟合曲线,确定结构碰撞刚度系数 k_{ck}。根据图 8 拟合结果,工况 5 和工况 6 的结构碰撞刚度系数分别为 90 934.241 86、121 318.128 9 N/m,其余工况的求解结果见表 3。

表 2　工况 5 和工况 6 不同碰撞刚度系数所对应的能量参数

Tab. 2　System energy corresponding to different impact stiffness coefficients in case 5 and case 6

WC	k_c/(N·m^{-1})	$\Delta W_{GW}+\Delta E_{GW}$/J	ΔE_{int}/J	ΔE_S/J	ΔW_{GS}/J	ΔW/J
5	80 000	−3.399 2	0.722 4	2.564 0	0.060 6	−0.052 2
	90 000	−3.810 9	1.110 0	2.624 2	0.076 3	−0.000 4
	100 000	−4.163 2	1.330 5	2.781 8	0.080 7	0.029 8
	110 000	−4.454 9	1.627 0	2.830 4	0.085 0	0.087 5
	120 000	−4.692 7	2.000 0	2.768 5	0.088 9	0.164 7
6	100 000	−14.913 0	2.602 7	11.910 0	0.035 0	−0.366 0
	110 000	−16.219 0	2.870 6	13.075 0	0.045 8	−0.228 0
	120 000	−17.364 0	3.288 1	13.980 0	0.056 0	−0.040 0
	130 000	−18.387 0	4.111 7	14.363 0	0.066 1	0.154 0
	140 000	−19.174 0	3.999 5	15.279 0	0.058 4	0.163 0

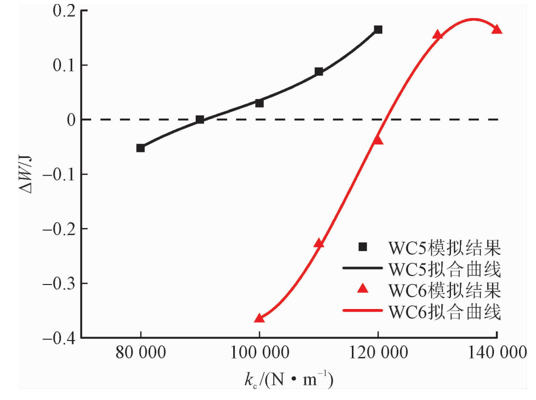


图 8　工况 5 和工况 6 的 ΔW-k_c的拟合曲线

Fig. 8　Fitting curve of collision stiffness coefficient and system energy in condition 5 and 6

4.2　冲击力时程变化

如表 3 所示,从冲击力幅值角度看,有限质点法和试验误差范围在 −20.29% ~14.98% 之间,且有限质点法得到的冲击力幅值和动量关系与试验一致。

图 9 是有限质点法和试验得到的以工况 1 ~3 冲击力时程曲线对比图。由对比结果可知,有限质点法得到的时程曲线近似半正弦曲线,试验曲线近似三角形。不同的冲击荷载形式会对结构反应产生不同的影响。然而,当荷载脉冲长度比 t/T,即冲击力作用时间和结构固有自振周期的比值小于 0.25 时,结构动态响应主要依赖于作用冲量,冲击荷载形式对其影响不大。根据试验,3 种工况冲击持续最长时间为 25 ms,且用 3D3S 14 计算结构的固有周期为 205.75 ms,由此可得结构荷载脉冲长度比为 25/20.575 = 0.122 < 0.25,故有限质点法得到的半正弦波对结构动态响应的影响不大。

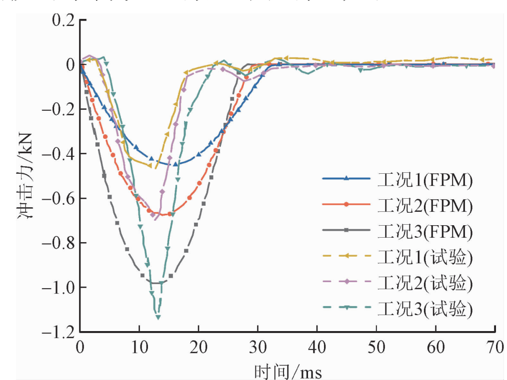


图 9　工况 1 ~3 冲击力时程曲线对比

Fig. 9　Comparison of time history curves of impact force under conditions 1 ~3

表 3　不同工况的冲击力幅值

Tab. 3　Amplitude of impact force under different conditions

WC	k_{ck}/(N·m^{-1})	冲击力幅值 FPM/N	冲击力幅值 试验值/N	误差/%
1	25 064.346 28	448.368 2	562.5	−20.29
2	30 238.684 02	675.346 1	700.7	−3.62
3	34 151.384 87	983.085 2	1 139.6	−13.73
4	9 302.052 86	262.798 8	254.6	3.22
5	90 934.241 86	1 041.007	905.4	14.98
6	121 318.128 9	2 098.433 2	2 025	3.63
7	28 820.820 82	3 996.462	3 497	14.28

4.3　结构动力失稳分析

结构动力失稳分析分为 2 个方面,其一为同一

工况下结构不同位置的位移响应,其二为综合多种工况,得到结构的临界失稳动量。

图 10 为有限质点法和试验得到的工况 7 点 C、D、E、F 的位移时程曲线。结果表明,有限质点法得到的点 C 和点 D 的竖向位移数值偏小,但节点位移变化呈现出相同的规律:1)点 C 的竖向位移最先达到最大值,其次是点 D、点 E 和点 F;2)在冲击作用下,4 个节点的位移时程曲线呈现出明显的凹陷,位移迅速增大,冲击结束后,节点在平衡位置处上下振动;3)在结构纵向,点 C 的位移响应要大于点 D 的位移响应,但由于支座约束的影响,在跨度方向,距离冲击点较近的点 E 的位移响应要小于与冲击点距离较远的点 F 的位移响应。

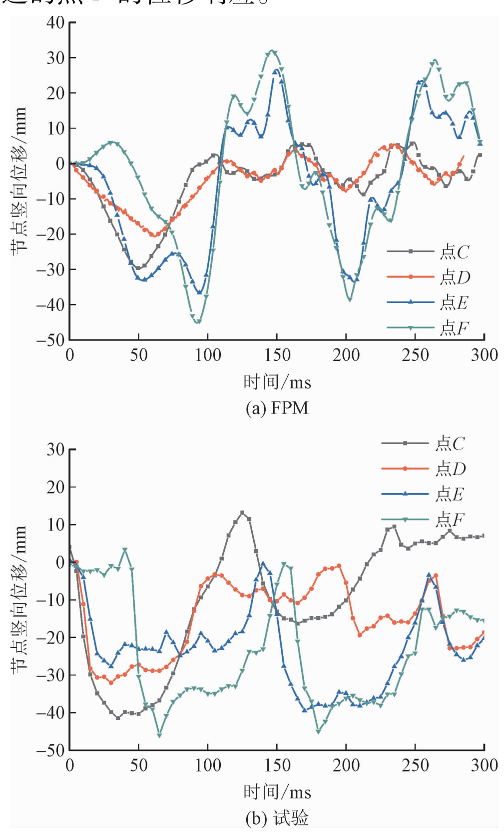


图 10 工况 7 节点位移时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of time history curves of displacement under condition 7

文献[20]给出判断单层网壳结构动力失稳的 2 个指标:第 1 指标通过判断以网壳结构运动的位移包络面上的最大位移来确定失稳,当动量达到某一数值时,结构位移包络线会突然增大;第 2 指标通过判断特征节点竖向位移来确定失稳。通过特征节点竖向位移随动量的变化反映网壳结构由局部失稳到整体失稳的过程。

图 11 以第一指标判断动力失稳,由图可知:1)当冲击动量达到 120 kg · m/s 时 3 个节点位移包络发生大幅度增加,说明结构在动量处于 20 ~ 120 kg · m/s时发生动力失稳;2)不同冲击动量下的位移包络以 5 kg·m/s 最小,以 120 kg·m/s 最大,中间从小到大排列依次为 4.36、6.2、10 和 20 kg·m/s;3)数值模拟好试验均表明冲击动量为 5 kg · m/s 时的结构动力响应要小于 4.36 kg · m/s 下结构的动力响应,这是表明虽然前者的冲击物质量较大,但冲击速度较小,在一定程度下,速度对结构动力响应的更为显著。

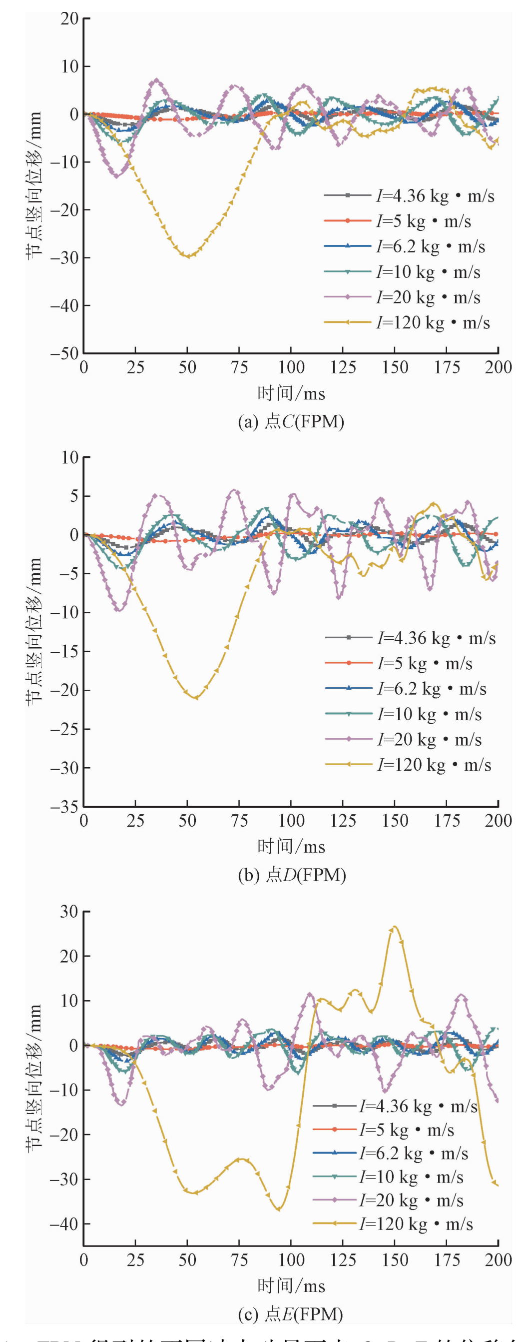


图 11 FPM 得到的不同冲击动量下点 C、D、E 的位移包络图

Fig. 11 Displacement envelope of point C, D and E under different impact momentum simulated by FPM

图 12 以第 2 指标判断动力失稳。图中给出不同动量下点 C、D、E、F 的最大竖向位移对比。对于点 C、点 D 和点 E，当冲击动量为 120 kg · m/s 时节点竖向位移最大值大幅增加，节点发生失稳。但对于点 F，试验所得位移在动量为 20 kg · m/s 就已失稳，而有限质点法要达到 120 kg · m/s 才发生失稳。

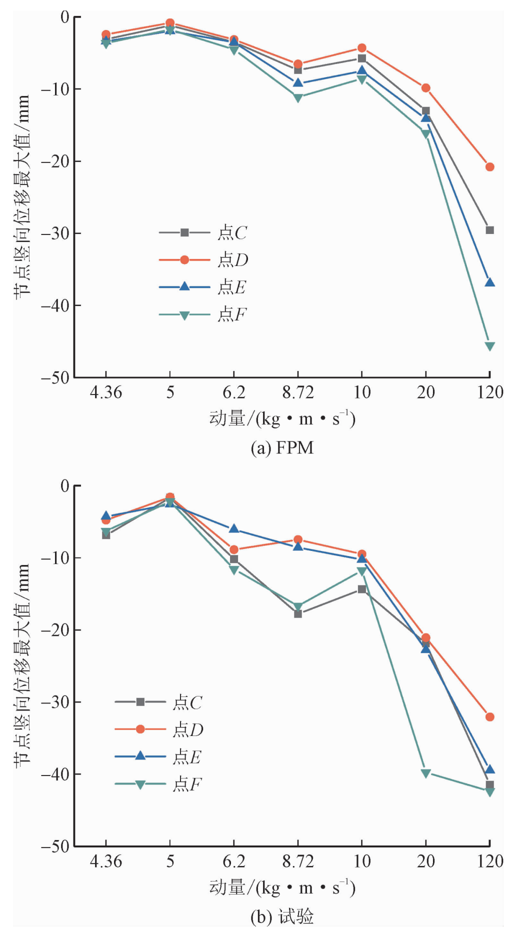


图 12　不同冲击动量下点 C、D、E、F 最大竖向位移对比

Fig. 12　Comparison of maximum vertical displacement of point C, D, E and F under different impact momentum

4.4　能量传递过程分析

单层柱面网壳的能量传递分为 2 个研究区段，如图 13 所示，以工况 7 为例说明能量传递过程。如图 13(a)所示，工况 7 冲击结束时间为 93.06 ms，发生冲击后，冲击区杆件 2 和杆件 3 率先产生动力响应。随后依据距撞击点距离，其余杆件依次发生响应，但整体响应时间不超过 5 ms，远小于冲击结束时间，其中以非冲击区的杆件 1 动力响应最为明显，说明在冲击结束前，网壳结构整体已经产生了明显的动力响应。同时在这一阶段，能量更易朝着靠近结构边缘的杆件 1 和杆件 2 传递，而同为冲击区的杆件 3 的应变能较杆件 2 要小。这是因为撞击点左侧结构的纵向长度小于其右侧结构，故其刚度更大，受力时所分配的力更多，应变能更大。

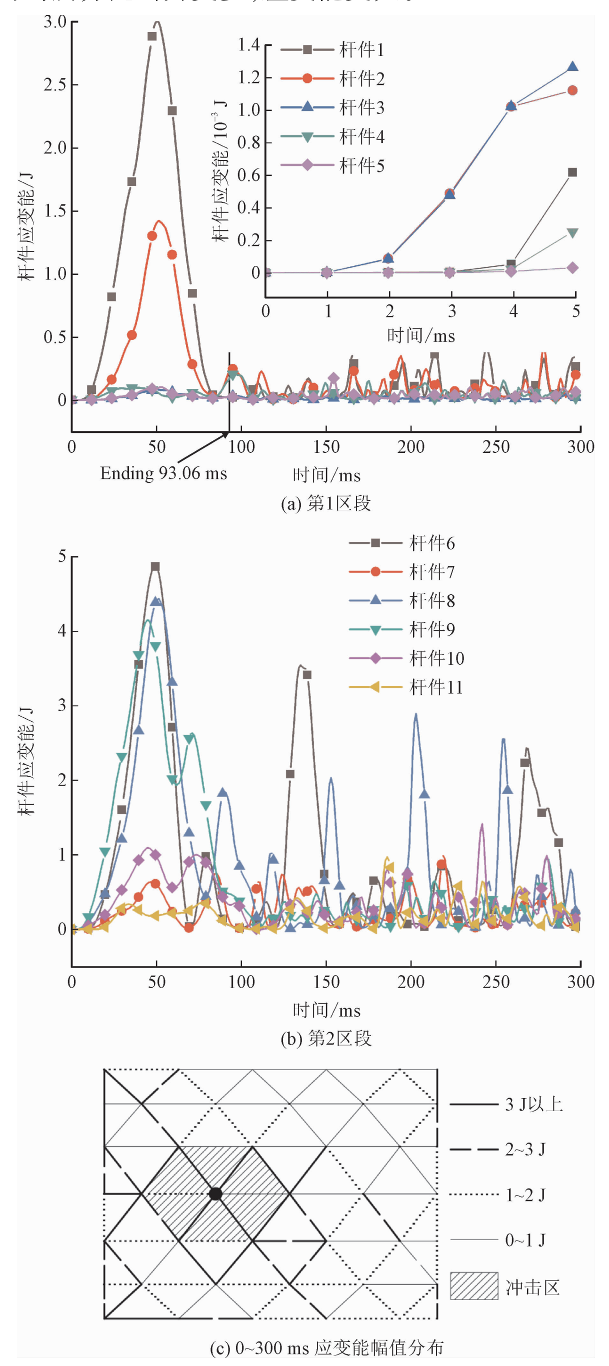


图 13　杆件应变能变化

Fig. 13　Changes of strain energy of members

图 13(b)则说明能量更易沿着网壳斜杆传递。第 2 区段杆件的应变能幅值在 0.361 ~ 4.86 J 之间，显著大于第 1 区段杆件应变能幅值范围，杆件 6、8 和 9 产生的能量均大于杆件 1。距离支座较近的杆件 6 和处于冲击区的杆件 8 在随后的振动阶段的应变能出现多个峰值，说明单层柱面网壳受冲击荷载

作用时,冲击区和支座为受力的薄弱部位,其稳定性较差。图 13(c)可印证上述结论,在跨度方向、支座周边和冲击区周边的杆件能量较大,同时斜杆所产生的应变能要大于纵向杆件,这与基于力流理论的单层球面网壳结构的传力特点具有相似性[21]。

4.5 误差分析

上述对比中,有限质点法能够反映真实情况下网壳结构受冲击时的动态响应,并能从中推导出与实际情况相符的结论,但在部分数值,尤其是位移部分,有限质点法和试验的差值较大,原因分析如下。

1)有限质点法未能考虑网壳结构焊接节点的残余应力,尚未建立网壳结构节点损伤模型,致使有限质点法网壳模型有更好抗冲击性,所得的节点竖向位移和杆件应变要小于试验结果。

2)有限质点法采用的对称罚函数碰撞模型简化了冲击面几何形状、粗糙度、接触面积的影响,以冲击物和被冲击物发生穿透计算冲击力。

3)有限质点法采用点值描述,将杆件的质量全部集中在质点上,单元不存在弯曲变形,弱化了网壳结构节点受杆件的牵连作用。

5 结 论

1)本研究根据能量守恒定律提出了基于有限质点法的结构碰撞刚度系数确定方法。利用以对称罚函数为基础的双球碰撞模型建立有限质点法冲击模型,编入适用于解决金属冲击问题的 Cowper-Symonds 本构模型。

2)对比不同工况下单层柱面网壳定点受冲击作用的动态响应,结果表明:①从冲击力幅值来看,有限质点法获取的冲击力幅值与试验吻合度较高,冲击力幅值的误差范围为 $-20.29\% \sim 14.98\%$;从冲击荷载形式来看,有限质点法时程曲线近似半正弦曲线,试验所得时程曲线近似三角形曲线,经验算冲击荷载形式不会成为影响结构动态响应的主要因素。②从动态失稳分析来看,结构的整体失稳动量为 120 kg · m/s,靠近支座的节点 F 受支座约束的影响,其竖向位移要大于其他 3 个节点。同时,工况 4 的动力响应要小于冲击动量更小的工况 1,表明冲击造成的结构动态响应在一定程度上由冲击速度控制。③从能量传递过程来看,冲击产生的应变能更易沿着网壳斜杆传递,并且冲击区杆件和刚度较大的杆件如跨度方向、支座处也成为主要的受力构件。

3)有限质点法能模拟出结构受冲击时的动态响应,所得冲击力、节点位移、应变等参数的时程变化规律与试验一致,可以从定性和定量 2 个方面判断结构受冲击的薄弱部分,为提高相关结构抗冲击性能提供理论依据。

参考文献:

[1] 刘建伟. 单层柱面筒支钢网壳受冲击荷载作用下的动力响应研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.

[2] 郑延丰. 结构精细化分析的有限质点法计算理论研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[3] 王多智,范峰,支旭东,等. 冲击荷载下网壳结构的失效模式及其动力响应特性[J]. 工程力学,2014,31(5):180-189.
WANG Duozhi, FAN Feng, ZHI Xudong, et al. Failure modes and characteristics of dynamic response for reticulated shells under impact[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(5):180-189 (in Chinese).

[4] 王孟鸿,赵要祥,郑晓彬. 网架结构在山体滑坡冲击下的垮塌模拟分析[J]. 应用力学学报,2019,36(5):1069-1075.
WANG Menghong, ZHAO Yaoxiang, ZHENG Xiaobin. Collapse simulation of grid structure under landslide impact[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(5):1069-1075 (in Chinese).

[5] TING E C, SHIH C, WANG Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part Ⅰ. Basic procedure and a plane frame element[J]. Journal of mechanics, 2004, 20(2):113-122.

[6] TING E C, SHIH C, WANG Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part Ⅱ. Plane solid elements[J]. Journal of mechanics, 2004, 20(2):123-132.

[7] SHIH C, WANG Y K, TING E C. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: part Ⅲ. Convected material frame and examples[J]. Journal of mechanics, 2004, 20(2):133-143.

[8] 喻莹. 基于有限质点法的空间钢结构连续倒塌破坏研究[D]. 杭州:浙江大学,2010:146-167.

[9] 喻莹,罗尧治. 基于有限质点法的结构碰撞行为分析[J]. 工程力学,2013,30(3):66-72.
YU Ying, LUO Yaozhi. Impact analysis of structures based on finite particle method[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(3):66-72 (in Chinese).

[10] 喻莹,朱兴一,罗尧治. 模拟结构倒塌破坏的有限质点法[J]. 计算力学学报,2014,31(4):495-500.
YU Ying, ZHU Xingyi, LUO Yaozhi. Finit particle method for structural collapse simulation[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2014, 31(4):495-500 (in Chinese).

[11] 丁北斗,吕恒林,李贤,等. 单层柱面网壳冲击试验研究[J]. 振动工程学报,2015,28(5):692-702.
DING Beidou, LÜ Henglin, LI Xian, et al. Experimental study on single-layer cylindrical reticulated shell under impact force[J]. Journal of vibration engineering, 2015, 28(5):692-702 (in Chi-

nese).

[12] 丁承先,段元锋,吴东岳. 向量式结构力学[M]. 北京:科学出版社,2012:1-76.

[13] 尚延安. 基于向量式结构力学的空间钢结构连续性倒塌分析研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.

[14] 马肖彤. 冲击荷载下单层网壳结构动力响应分析与试验研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2015.

[15] 范峰,王多智,支旭东,等. 冲击荷载下凯威特型球面网壳的失效模式及其判别方法[J]. 土木工程学报,2010,43(5):56-62.
FAN Feng, WANG Duozhi, ZHI Xudong, et al. Failure modes and discrimination method for Kuwait reticulated dome under impact loads[J]. China civil engineering journal, 2010, 43(5): 56-62(in Chinese).

[16] 朱冠芳,李春旺,武晓亮,等. 外物撞击 TC4 钛合金叶片 Cowper-Symonds 模型参数反演[J]. 应用力学学报,2019,36(4):945-950.
ZHU Guanfang, LI Chunwang, WU Xiaoliang, et al. The TC4 alloys parameter inversion of Cowper-Symonds model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(4): 945-950(in Chinese).

[17] 窦英睿. 凹坑型外物损伤对 TC4 高循环疲劳性能的影响及预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

[18] WANG J. Study on a Zerilli-Armstrong and an artificial neural network model for 4Cr5MoSiV1 quenched steel at high strain rate[C]//2011 Seventh International Conference on Natural Computation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 247-250.

[19] 王震,胡可,赵阳. 考虑 Cowper-Symonds 黏塑性材料本构的向量式有限元三角形薄壳单元研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):71-77.
WANG Zhen, HU Ke, ZHAO Yang. Study on triangular thin-shell element of vector form intrinsic finite element considering Cowper-Symonds viscoplastic constitutive model[J]. Journal of building structures, 2014, 35(4): 71-77(in Chinese).

[20] 郭海山,沈世钊. 单层网壳结构动力稳定性分析方法[J]. 建筑结构学报,2003,24(3):1-9.
GUO Haishan, SHEN Shizhao. Analysis method of dynamic stability of single layer reticulated domes[J]. Journal of building structures, 2003, 24(3): 1-9 (in Chinese).

[21] 薛龙瑞. 结构力流分析与传力效率评价方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

（编辑　史淑英）

